Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 16, No. 1, 2024, p. 63-80

The Effects of Climate Change on Yield and Phenological Stages of Potato Plant (Case Study: South of Kerman Province)

Fateme Bayatani[1] and Keramat Nezhadafzali[2*]

1- Ph.D, Department of Geography, Faculty of Literature, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Jiroft University, Jiroft, Iran.
(*- Corresponding author's Email: k.nezhadafzali@ujiroft.ac.ir)

Received: 05-06-2022 Revised: 09-01-2023 Accepted: 18-03-2023 Available Online: 18-03-2023	**How to cite this article:** Bayatani, F., & Nezhadafzali, K. (2024). The Effects of Climate Change on Yield and Phenological Stages of Potato Plant (Case Study: South of Kerman Province). *Journal of Agroecology, 16*(1), 63-80. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/agry.2023.77055.1116

Introduction

Food security is one of the most important concerns of human society. Given the importance of climate for the agricultural sector, achieving long-term climate forecasts in this area is essential. The advent of global climate (GCM) and regional models (RCM) has made it possible for researchers to study the impact of climate on agricultural products. Predicted climate change, especially the increase in atmospheric carbon dioxide and temperature, as well as changes in the amount and patterns of rainfall, will have severe effects on agricultural production and food security, especially in arid and semi-arid regions. Therefore, any change in the world climate, directly affects the production of agricultural products in different parts of the world and, consequently, the issue of food security in the world. This study was conducted to investigate the effects of climate change on yield and length of phenological stages of potato plant in tropical and subtropical regions of Kerman province.

Materials and Methods

The study area in this research includes stations with a statistical period of 17 years (1989 to 2005), including Jiroft, Kahnooj, and Manojan. In this study, maximum and minimum temperature data, precipitation, average relative humidity, average wind speed, and sunny hours on a daily time scale were used for the exponential microscale. From the output of the CanESM2 general circulation model was used under the three scenarios rcp2.6, rcp4.5, and rcp8.5. The SDSM microscale model was used to exponentially scale the output of the general circulation model. In order to prepare field data for calibration and to determine the validity of the WOFOST model in potential conditions, data from research projects of Jiroft Agricultural Research Center during 2010-2011 were collected and used as a basic course. This information includes planting date, phenological stages from planting to emergence, emergence to flowering, and emergence to physiological maturity of the potato plant in the study areas.

Results and Discussion

The results of WOFOST model validation for phenological stages and potato yield provided acceptable

https://doi.org/10.22067/agry.2023.77055.1116

estimates for both variables. The ability of the SDSM model to simulate meteorological parameters was confirmed, however, the model showed less accuracy in simulating precipitation. The simulated maximum and minimum temperatures for the next period (2011-2100) under RCP scenarios increased compared to the observation period in all three RCP scenarios. Precipitation has also will change in future periods in all three scenarios and show a declining trend. Combining the results of the CanESM2 climate model under RCP scenarios in three climate periods 2011-2041, 2041-2070 and 2071-2100 with the WOFOST growth simulation model showed that the length of different phenological stages and potato tuber yield under potential conditions will be reduced in the study areas. The stage of germination to the physiological maturation of the tubers, due to its longer duration, the greatest reduction in the length of the period occurred in this stage. The results of potato tuber yield simulation showed a decrease in yield in the study areas. According to the results, the highest reduction in performance was observed in the third period (2071-2100). The percentage of glandular function reduction was observed on average between 2 and 4.3%. In general, the results showed an increase in the average minimum and maximum temperatures of 0.37 to 0.9 degrees Celsius over the next three periods. The length of the phenological stages of the potato plant from emergence to physiological maturity has decreased in parallel with the increase in the mean minimum and maximum temperatures. The reduction in the length of the germination stage is between 0.2 to 1.9 days, the flowering stage is between 0.5 to 1.7 days, and the maturation stage to maturity is between 1.4 to 3.5 days. The greatest reduction during the phenological stages is related to the emergence stage to maturity of 3.5 days.

Conclusion

In general, the results of this study indicate an increase in the negative effects of climate change on the potato plant in three stations of Jiroft, Kahnooj, and Manojan. As the temperature rises and the rainfall decreases, and naturally, the length of the growing season and the yield of potatoes decrease, the amount of damage in future climates will increase. Generally, for one degree Celsius increase in average annual temperature, tuber yield will decrease by 4.99%.

Keywords: General Circulation Model, Exponential Microscale, WOFOST Model, Phenological Stages of Potato, South of Kerman Province

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳، ص ۸۰-۶۳

اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (مطالعه موردی: جنوب استان کرمان)

فاطمه بیاتانی[1] و کرامت نژادافضلی[2*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

چکیده

سیب‌زمینی از محصولات مهم زراعی است که به‌عنوان یک محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی در آینده شناخته شده است. با توجه به پدیده گرمایش جهانی و تحت تأثیر قرار دادن تولیدات محصولات کشاورزی، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید سیب‌زمینی در کشور ضروری می‌باشد. بدین منظور، از داده‌های مدل اقلیمی CanESM2، تحت سناریوهای انتشار RCP4.5, RCP2.6 و RCP8.5 در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری استان کرمان، استفاده گردید. از مدل آماری SDSM، برای ریزمقیاس نمایی خروجی مدل CanESM2، و از مدل WOFOST به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد غده و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی استفاده شد. در این مطالعه، مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای سال-های ۹۰،۸۹ و ۹۲ کالیبراسیون و با داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ تعیین اعتبار گردید. نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های آماری، نشان از دقت بالای مدل SDSM و مدل WOFOST و مطابقت نتایج کالیبراسیون و تعیین اعتبار با داده‌های دیدبانی بود. میانگین مربعات خطا در دو مدل SDSM و WOFAST در مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۸ و ۷/۴ درصد تجاوز نکرده و در محدوده عالی قرار داشت. ۸۷ درصد مراحل فنولوژیک و بالای ۹۰ درصد عملکرد غده سیب‌زمینی، در اطراف خط استاندارد (SE±) مراحل فنولوژیک و عملکرد دیده‌بانی شده قرار داشت. نتایج شبیه‌سازی در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوهای RCP نشان‌دهنده افزایش دمای کمینه در محدوده ۰٫۳ تا ۱٫۳ درجه سلسیوس، دمای بیشینه در محدوده ۰٫۳ تا ۱٫۲ درجه سلسیوس و کاهش بارش در محدوده ۶/۴- تا ۳۷/۶- میلیمتر خواهد بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد غده و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در دوره آینده توسط مدل WOFOST، بیانگر کاهش عملکرد سیب‌زمینی به‌میزان ۰/۸- تا ۶/۳- درصد بود. میانگین حداکثر کاهش طول رشد با ۳/۵- روز در سناریوی RCP8.5 مربوط به مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) بود. همچنین نتایج نشان داد که به‌ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش میانگین دما سالانه، عملکرد غده به‌میزان ۴/۹۹ درصد کاهش خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس نمایی، مدل گردش عمومی، مدل WOFOST، مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی

مقدمه

پدیده تغییر آب و هوا به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر در سطح دنیا شناخته شده است. تغییرات آب و هوایی و عواقب و آثار آن از ابعاد اجتماعی–اقتصادی، زیست محیطی، سیاسی و امنیتی دارای اهمیت خاص می‌باشد و در ابعاد ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی باید مورد توجه قرار گیرد. بخش کشاورزی به‌سبب تعاملات گسترده و مستقیم با محیط، بیشترین تأثیر را از پدیده تغییر اقلیم می‌پذیرد، و به تغییرات آب و هوایی و پدیده‌های خاص مانند خشکسالی، سیلاب‌ها و طوفان‌های شدید حساس است. ممکن است افزایش دما نقش مثبتی در تولید غذا داشته باشد، امّا افزایش پتانسیل خشکسالی، سیل و امواج گرمایی، چالش کشاورزان را افزایش خواهد داد (Banihashemi,

۱- دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
۲- استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: k.nezhadafzali@ujiroft.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/agry.2023.77055.1116

2012). در صورتی‌که اقدامات مناسبی در جهت کاهش اثرات تغییر اقلیم و سازگاری با آن صورت نگیرد، این پدیده می‌تواند بخش عمده-ای از جهان، از جمله کشاورزی و منابع آب را تحت تأثیر قرار دهد (Taei Samiromi et al., 2014). بنابراین، هر گونه تغییر در وضعیت آب و هوای جهان، به‌طور مستقیم در تولید محصولات کشاورزی مناطق مختلف دنیا و در نتیجه بر موضوع تأمین امنیت غذایی در سطح جهان تاثیرگذار است.

امنیت غذایی یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جامعه بشری است و پیش بینی می‌شود با رشد جمعیت، برای تأمین مواد غذایی مورد نیاز جامعه جهانی در سال ۲۰۵۰ میلادی، تولید مواد غذایی حدود ۷۰ درصد افزایش یابد (Dalghandi et al., 2014). تغییرات پیش بینی شده اقلیمی به‌ویژه افزایش میزان دی اکسید کربن اتمسفر، درجه حرارت و نیز تغییر در میزان و الگوهای بارندگی اثرات شدیدی بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک خواهد داشت. اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک از یک طرف، به‌دلیل ساختار اکولوژیکی خاص خود بیش از سایر اقلیم‌ها نسبت به تغییرات محیطی حساس بوده و آسیب‌پذیری بیشتری دارند. از طرف دیگر، همانطور که آشکار است از مفاد بارز و آشکار پدیده تغییر اقلیم در بخش کشاورزی، تأثیر در اکوسیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های کشاورزی می‌باشد (Bayatani, 2019). بنابراین، به نظر می‌رسد که وقوع تغییرات احتمالی اقلیمی در این مناطق اثرات قابل ملاحظه‌ای بر سیستم‌های تولید کشاورزی به همراه داشته باشد (Turkaman, 2016).

علی رغم تلاش‌های بسیار زیاد اقلیم شناسان، هنوز عدم قطعیت‌های قابل توجهی در مورد اثرات بالقوه تغییر اقلیم در بخش کشاورزی وجود دارد (Gouache et al., 2012). با این وجود، تغییر اقلیم بر تغییر فنولوژی و فیزیولوژی گیاه، بیلان آب در خاک، تبخیر و تعرق و بارندگی مؤثر بر رشد، عملکرد و نیاز آبی گیاهان تأثیر دارد (Darzi Naftchali & Karandish, 2016). بر اساس تحقیقات صورت گرفته افزایش غلظت دی اکسید کربن اتمسفر سبب افزایش عملکرد گیاهان C3 مانند گندم، برنج و سویا شده و سبب افزایش عملکرد اندکی در گیاهان C4 مانند ذرت، سورگوم و نیشکر می‌شود (Ficher et al., 2007).

سیب‌زمینی (potato) گیاهی است یک ساله از تیره Solanaceae با نام علمی (*Solanum tubresum* L.) که اندام اقتصادی آن ساقه زیرزمینی می‌باشد (Khajehpour, 2008). سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) پس از گندم (*Triticum* L.)، برنج (*Oryza sativa*.L) و ذرت (*Zea mays* L.)، چهارمین محصول در سبد غذایی جوامع بشری است (FAO, 2012)، که نشان از اهمیت نقش آن در تأمین پروتئین و نیازهای غذایی مردم دارد. سازمان خواروبار و کشاورزی-جهانی، سیب‌زمینی را یک محصول تامین‌کننده امنیت غذایی آینده در دنیا معرفی نموده و کشور ایران با داشتن اقلیمی متنوع و با تولید سالانه پنج میلیون تن سیب‌زمینی در رتبه سیزدهم تولید این محصول در جهان قرار دارد (FAO, 2019). سیب‌زمینی از نظر توازن پروتئین در غده‌ها، دارا بودن اسیدهای آمینه مهم سازنده پروتئین، ویتامین‌ها و مواد معدنی در تغذیه دارای اهمیت ویژه می-باشد. برخی از تغییرات رخ داده در دوره رشد گیاهی در مقابل تغییر شرایط اقلیمی، در مقیاس محلی و منطقه‌ای قابل مشاهده است.

طبق مطالعات و تحقیقات انجام شده، تأثیر افزایش غلظت دی اکسید کربن اتمسفر و تغییرات آب و هوایی همراه با آن بر گیاهان زراعی کاملا به شرایط محیطی بستگی دارد و ممکن است از محلی به محل دیگر تفاوت کند. از طرف دیگر، مدل‌های گیاهی از جمله مدل WOFOST به‌دلیل دقت بالا در شبیه سازی ابزار مناسبی جهت پیش بینی عملکرد محصول در شرایط تغییر اقلیم است. هدف از این مطالعه بررسی اثر گرمایش جهانی از طریق کاربرد مدل گردش کلی CanESM2[1] بر اساس سناریوهای انتشار RCP2.6 ,RCP4.5 و RCP8.5 و مدل شبیه‌ساز رشد و نمو WOFOST[2] در شرایط اقلیمی جنوب استان کرمان جهت شبیه سازی مراحل فنولوژی و عملکرد محصول سیب‌زمینی در شرایط پتانسیل می‌باشد. بنابراین، با توجه به اهمیت وضع هوا و اقلیم بر بخش کشاورزی، دستیابی به پیش‌بینی‌های بلند مدت اقلیمی در این بخش ضروری است (Bayatani, 2019). پیدایش مدل‌های اقلیم جهانی (GCM[3]) و منطقه‌ای (RCM[4]) این امکان را به‌وجود آورده است تا محققان بتوانند تأثیر وضع هوا و اقلیم را در مقیاس‌های زمانی بلند مدت بر محصولات مختلف کشاورزی بررسی نمایند (Esmaili et al., 2011).

با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی در جیره غذایی بشر و تاثیر

1- Canadian Earth System Model
2- World Food Studies.
3- General circulation model.
4- Regional climate model.

پذیری آن از شرایط اقلیمی و محیطی بخصوص دما و رطوب ، در این تحقیق به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان عملکرد و طول دوره‌های رشد گیاه سیب زمینی پرداخته شد. به همین منظور از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM جهت ریزمقاس نمایی برونداد مدل گردش کلی جو CanEMS2 تحت سناریوی های RCP و مدل رشد و نمو WOFOST، استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق می تواند جهت اتخاذ روش های سازگاری با تغییر اقلیم مورد استفاده مسئولان سازمان جهاد کشاورزی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق ایستگاه‌های با طول دوره آماری ۱۷ ساله (۱۹۸۹ تا ۲۰۰۵) شامل جیرفت، کهنوج و منوجان می باشد. در این مطالعه جهت ریزمقیاس نمایی از داده‌های دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس زمانی روزانه استفاده گردید. خروجی مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ مقیاس می‌باشند، بنابراین جهت ریز مقیاس نمایی خروجی مدل گردش عمومی از مدل ریزمقیاس‌کننده SDSM استفاده شد. در مدل SDSM به‌منظور ریز مقیاس نمایی داده‌های پارامترهای اقلیمی از سه نوع داده الف- متغیرهای بزرگ مقیاس در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۱۱) مدل گردش کلی CanEMS2[1]، ب- متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP در دوره (۲۰۰۵-۱۹۸۹) و ج- داده‌های دیده‌بانی (دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی) روزانه مورد استفاده قرار گرفته است (Bayatani, 2019). به‌منظور تهیه داده‌های مزرعه‌ای جهت واسنجی و ارزیابی مدل WOFOST در شرایط پتانسیل (شرایط بدون محدودیت آب و غذا، کنترل بیماری-هاو علف‌های هرز) از داده‌های طرح‌های تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی جیرفت طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ جمع‌آوری و به‌عنوان دوره پایه یا دیده‌بانی مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات شامل تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) گیاه سیب‌زمینی در مناطق مورد مطالعه می‌باشد. به‌منظور کالیبراسیون مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، از داده‌های فنولوژیکی و عملکرد در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ و از داده‌های فنولوژیکی و عملکرد در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد.

مدل تولید داده SDSM

یکی از مهم‌ترین مدل‌های ریزمقیاس نمایی آماری مدل SDSM است که مولد مصنوعی داده‌های هواشناسی می‌باشد. در این تحقیق، از داده‌های خروجی مدل گردش عمومی جو (CanESM2) تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. مدل SDSM در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شده است. مدل SDSM روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و محلی (پیش-بینی شونده‌ها) محاسبه می‌کند (Willby et al., 2002). در این مدل، اقلیم محلی توسط اقلیم بزرگ مقیاس منطقه در فرم R=F(X) بیان می‌شود. که در اینجا R نشان‌دهنده متغیر محلی است که کوچک مقیاس شده است، X مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس است و F یک تابع تعیین مشروط به X است که بر اساس آموزش و اعتبارسنجی داده‌های تاریخی بدست می‌آید (Bayatani, 2019).

در این تحقیق در ابتدا به‌منظور واسنجی و صحت یابی مدل SDSM، متغیرهای بزرگ مقیاس مشاهداتی (جدول ۱) منطقه مورد مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۹ (متغیرهای استخراج شده از NCEP) به‌عنوان متغیر مستقل، و داده‌های دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی روزانه منطقه مشاهداتی منطقه درهمین دوره، به‌عنوان متغیر وابسته به‌طور جداگانه وارد مدل شدند. پس از واسنجی مدل SDSM، در ادامه به‌منظور بررسی توانایی مدل گردش کلیCanESM2 در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی منطقه، متغیرهای بزرگ مقیاس مدل CanESM2 در دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۱ به مدل SDSM (واسنجی شده در مرحله قبل) وارد گردیده و متغیرهای دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی منطقه برای این دوره کوچک مقیاس شدند. در نهایت، متغیرهای کوچک مقیاس شده منطقه با متغیرهای مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته و پس از کسب اطمینان از توانایی مدل CanESM2 درکوچک مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی منطقه، سری زمانی متغیرها با معرفی متغیرهای بزرگ مقیاس مدل CanEMS2 در دوره‌های (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱، ۲۱۰۰-۲۰۷۱) به مدل SDSM (واسنجی شده از مرحله قبل) برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی شدند.

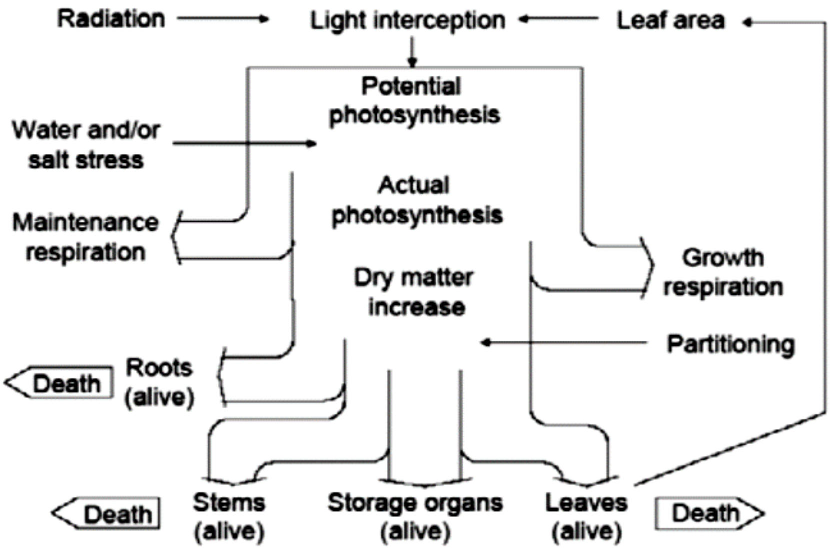
1- Canadian Earth System Model

جدول ۱- فهرست متغیرهای NCEP
Table 1- List of NCEP variables

ردیف Row	متغیر پیش‌بینی‌کننده Predictor variable	توضیحات Description
1	P5_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 500 hPa
2	P5_u	مولفه مداری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 500 hPa
3	P5_v	مولفه نصف النهاری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 500 hPa
4	P5_z	تاوایی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Vorticity at 500 hPa
5	P5th	سمت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Wind direction at 500 hpa
6	P5zh	واگرایی باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Divergence at 500 hPa
7	P500	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 500 hPa
8	r500	رطوبت نسبی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 500 hPa
9	P_f	سرعت باد زمینگرد Surface geostrophic airflow
10	P_u	مولفه مداری سرعت باد Surface horizontal wind
11	P_v	مولفه نصف النهاری سرعت باد Surface zonal wind
12	P_z	تاوایی Surface vorticity
13	P_th	سمت باد Surface wind direction
14	P_zh	واگرایی باد Surface divergence
15	P8_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 850 hPa
16	P8_u	مولفه مداری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 850 hPa
17	P8_v	مولفه نصف النهاری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 850 hPa
18	P8_z	تاوایی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Vorticity at 850 hPa
19	P8th	سمت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Wind direction at 850 hpa
20	P8zh	واگرایی باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Divergence at 850 hPa
21	P850	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 850 hPa
22	r850	رطوبت نسبی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
23	Mslp	میانگین فشار سطح دریا Mean sea level pressure
24	Rhum	رطوبت نسبی نزدیک سطح زمین Near surface relative humidity
25	Shum	رطوبت ویژه نزدیک سطح زمین Near surface specific humidity
26	temp	دمای هوا در ارتفاع ۲ متری 2-m air temperature

معرفی مدل WOFOST

مدل WOFOST نمو فنولوژیکی و رشد گیاه را از آغاز جوانه زنی تا زمان رسیدگی بر اساس خصوصیات ژنتیکی گیاه و شرایط محیطی توصیف می‌کند. این برنامه ماده خشک گیاه را به‌عنوان تابعی از تشعشع، دما و خصوصیت‌های گیاه در مراحل زمانی یک روز شبیه سازی میکند. اصول محاسبه تولید ماده خشک، سرعت ناخالص جذب CO_2 توسط کانوپی است، که به انرژی تابشی جذب شده بستگی دارد که تابعی از تشعشع روزانه، سطح برگ گیاه و ضریب خاموشی نور در کانوپی است. WOFOST میزان جذب CO_2 ناخالص از یک گیاه را بر پایه تشعشع فعال فتوسنتزی (۵۰ درصد از کل تشعشع خورشیدی با طول موج ۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) جذب شده توسط گیاه شبیه سازی می‌کند. CO_2 با استفاده از انرژی تأمین شده بوسیله نور به کربوهیدرات (CH_2O) تبدیل می‌شود. قسمتی از کربوهیدرات‌های باقیمانده در مسیر تنفس رشد به ماده خشک تبدیل می‌شوند، فرآیندهای ذکر شده ساختار مدل، در شکل ۱ ارائه شده است. رشد در مدل به‌صورت دینامیک با گام زمانی یک روزه شبیه سازی می‌شود (Taei Samiromi et al., 2012). مدل WOFOST دارای نسخه‌های مختلفی است که در طول سال‌های مختلف ایجاد شده است. در این مطالعه از نسخه WOFOST ver 7.1 استفاده شد، که توسط مرکز تحقیقات اگروبیولوژی و حاصلخیزی خاک و مرکز تحقیقات کشاورزی هلند در دانشگاه واخنینگن ساخته شده است.



شکل ۱- مراحل شبیه سازی رشد و نمو گیاه در مدل WOFOST (Supit et al., 1994)

Fig. 1- Stages of plant growth simulation in WOFOST model (Supit et al., 1994)

برای توصیف نمو فنولوژیکی گیاه در مدل WOFOST از متغیر DVS استفاده می‌شود که برای جوانه زنی، گلدهی و برداشت به ترتیب مقادیر ۰، ۱ و ۲ در نظر می‌گیرد که تابعی از درجه روز می‌باشد (Taei Samiromi et al, 2014). دوره زندگی سیب‌زمینی در مدل WOFOST به دو مرحله تقسیم می‌شود:

جوانه زنی (DVS=0) تا زمان گلدهی (DVS=1)

دوره زایشی: از گلدهی (DVS=1) تا زمان رسیدگی فیزیولوژیکی (DVS=2)

برای اجرای مدل WOFOST الف) به داده‌های هواشناسی (حداقل دما، حداکثر دما، میانگین رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، متوسط سرعت باد و بارش) به‌صورت روزانه و ب) داده‌های مزرعه‌ای لازم می‌باشد. داده‌های مورد نیاز برای کالیبراسیون و تعیین اعتبار مدل از آزمایشات مزرعه‌ای انجام شده در مرکز تحقیقات کشاورزی جیرفت فراهم شد. مرحله کالیبراسیون مدل WOFOST با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده رشد گیاه زراعی نظیر مشاهدات مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (کاشت تا سبز شدن، سبزشدن تا گلدهی

و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت)) و میـزان عملکـرد در سـال‌هـای ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و۱۳۹۲ انجـام گرفـت. بعـد از کالیبراسـیون نمودن مدل WOFOST، تعیین اعتبار مـدل بـا اسـتفاده از داده‌هـای مزرعه‌ای سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ انجام گرفت.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

جهت ارزیابی توانمندی و دقت مدل SDSM در شبیه‌سازی داده-های دیده‌بانی (۲۰۰۵-۱۹۸۹) و همینطور تعیین اعتبار و ارزیابی مـدل WOFOST در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی مختلـف گیـاه سـیب-زمینی و عملکرد غده سیب‌زمینی از معیارهای آماری، همچـون ریشـه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE[1])، جذر میـانگین مجـذور خطـای نرمال شده (RMSEn[2])، حداکثر خطا (ME[3])، ضـریب تبیـین (R^2)[4]، ضریب ناش ساتکلیف (E_{ns}[5]) استفاده گردید (Bayatani, 2019).

$$\mathbf{RMSEn} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2} \qquad \text{معادله (۱)}$$

$$\mathbf{ME} = \mathbf{Max}|S_i - M_i|.\frac{100}{\bar{M}} \qquad \text{معادله (۲)}$$

$$\mathbf{RMSEn} = 100\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2}}{\bar{M}} \qquad \text{معادله (۳)}$$

در این معادلات، Si و Mi به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و انـدازه-گیری شده، $\bar{M}$ میانگین مقادیر Mi و n تعداد مشـاهدات مـی‌باشـد. مقادیر جذر میانگین مجذور خطا و جذر میانگین مجذور خطای نرمـال شـده در حالـت اپتـیمم یـا حـالتی کـه مقـادیر شـبیه سـازی شـده و اندازه‌گیری شده مساوی باشد برابر با صفر و مقـدار کـارایی مـدل در این حالت برابر با یک می‌باشد.

همچنین می‌توان برای ارزیابی مدل WOFOST از نمودار مقادیر واقعی (Mi) در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده (Si) و از معادله رگرسیون خط ۱:۱ رسم شده استفاده کرد.

$$\mathbf{M_i = \beta M_i - \beta S_i(S)} \qquad \text{معادله (۴)}$$

سپس اختلاف عرض از مبدأ (βM_i)و ضریب متغیر، (βS_i) یا همان شیب خط رگرسیونی به‌ترتیب با صفر و یک مورد مقایسه قـرار گرفت.

1- Root Mean Squre Error
2- Root Mean Square Error-Normalized
3- Maximum Error
4 - R-Squared correlation
5 - Nash Sutcliffe coefficient

نتایج و بحث

کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل رشد گیـاهی WOFOST تحت شرایط مزرعه ای

پارامترهای مختلف مدل رشد گیاهی WOFOST کـه بـا هـدف حداقل کردن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شـده عملکـرد غـده و طـول مراحـل فنولوژیـک سـیب‌زمینی در مرحلـه کالیبراسیون نهایی شد در جدول ۲ آمده است. از بـین ایـن پارامترهـا TSUM1 و TSUM2، دمای پایه رشـد، TSUMEM، سـطح ویـژه برگ، حداکثر سرعت جذب CO2، بهره وری تبدیل به برگ، ریشـه و ساقه طبق جدول ۲ تعدیل شدند و سایر پارامترهـا بـه‌صـورت مقـادیر پیش فرض مدل در نظر گرفته شدند.

بر اساس نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده در مدت ۵ سال بـا تـاریخ کاشت‌های مرسوم (جدول ۳) میانگین طول دوره کاشت تا سبز شـدن ۲۳/۷ روز، میانگین دوره سبز شدن تا آغاز گلدهی ۳۴ روز و میـانگین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشـت) ۱۰۲/۷ روز، بطور متوسط برای منطقه مورد مطالعه محاسبه و تعیین گردیـد. مـدل در مرحله کالیبراسیون طول دوره سـبز شـدن را ۲۴/۳ روز، دوره آغـاز گلدهی را ۳۳/۷ روز و طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولـوژیکی را (برداشت) را ۱۰۰روز، بطور میانگین برای ۳ ایستگاه مـورد مطالعـه شبیه‌سازی نمود. در مرحله تعیین اعتبار مدل بطور میانگین طول دوره سبز شدن را ۲۲/۷ روز، طول دوره گلـدهی را ۳۴/۲ روز و طـول دوره سبز شدن تا رسـیدگی فیزیولـوژیکی (برداشـت) را ۱۰۱/۸ روز بـرای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی نمود.

مقایسه عملکرد شـبیه‌سـازی شـده بـا مقـادیر واقعـی در مرحلـه کالیبراسیون و اعتبارسنجی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجـه به شکل ملاحظه می‌شود که مقدار ضـریب R^2 محاسـبه شـده بـرای مراحل فنولوژیک و عملکرد در هر دو مرحلـه کالیبراسـیون و اعتبـار-سنجی به‌ترتیب بیش از ۰/۸۷ و ۰/۹۴ بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و عملکرد سیب‌زمینی است.

نتایج تعیین اعتبار مدل WOFOST بـرای مراحـل فنولوژیـک و عملکـرد سـیب‌زمینی در جـدول ۴ نشـان داده شـده اسـت. مـدل WOFOST برآورد قابل قبولی برای هر دو متغیر به همراه داشت. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص شد میزان عملکرد شـبیه-سازی شده، برازش خوبی با مقادیر دیده‌بانی شده دارد (شکل ۲).

جدول ۲- پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در مرحله کالیبراسیون در شرایط پتانسیل

Table 2- Plant parameters of the WOFOST model in calibration stage under potential conditions

پارامتر Parameter	توصیف پارامتر Parameter description	مقدار Value: پیش فرض Default	مقدار Value: تعدیل شده Justified	واحد Unit
TBASEEM	دمای پایین‌تراز آستانه برای ظهور Temperatures below the threshold for emergence	3	5	سانتیگراد °C
TSUMEM	مجموعه درجه روز از کاشت تا سبز شدن Daily degree set from planting to emergence	170	434.9	درجه روز °Cd
TSUM1	مجموعه درجه روز از سبز شدن تا گلدهی Daytime collection from emergence to flowering	150	502.1	درجه روز °Cd
TSUM2	مجموعه درجه روز از گلدهی تا بلوغ یا برداشت Daily degree set from flowering to maturity or harvest	1550	815.4	درجه روز °Cd
SLATB	سطح ویژه برگ Special surface of leaves	0.003	0.002	هکتار/کیلوگرم $ha.kg^{-1}$
AMAXTB	حداکثر سرعت جذب CO_2 Maximum rate of CO_2 uptake	30	35	کیلوگرم/هکتار/ساعت $kg.ha^{-1}.hr^{-1}$
CVL	بهره‌وری تبدیل به برگ Leaf conversion productivity	0.720	0.760	کیلوگرم/کیلوگرم $kg.kg^{-1}$
CVR	بهره‌وری تبدیل به ریشه Productivity becomes the root	0.720	0.755	کیلوگرم/کیلوگرم $kg.kg^{-1}$

جدول ۳- طول دوره مراحل فنولوژیکی بر اساس تاریخ کاشت (تعداد روز از اول ژانویه) بصورت میانگین طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹

Table 3– Duration of phenological stages based on planting date (day from January 1) on average during the years 2011-2015

شهر City	سال Year	تاریخ کاشت Date of planting (day)	مراحل فنولوژیکی (روز) Phenological stages: کاشت تا سبز شدن Planting-Sprout (day)		سبز شدن تا گلدهی Sprout-flowering (day)		سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) Sprout-physiological (day) maturity	
			شبیه سازی Simulated	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulated	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulated	دیدبانی Observation
جیرفت Jiroft	1389	260	25	26	35	37	104	106
	1390	260	23	24	33	34	98	100
	1391	260	24	26	36	37	100	102
	1392	260	24	25	34	36	103	105
	1393	260	22	24	33	35	106	108
کهنوج Kahnuoj	1389	260	24	24	32	33	104	103
	1390	260	24	25	35	36	102	101
	1391	260	22	24	34	36	104	103
	1392	260	22	23	32	33	96	98
	1393	260	24	26	34	35	101	102
منوجان Manuojan	1389	260	21	22	33	35	102	104
	1390	260	23	24	34	35	97	99
	1391	260	20	22	33	35	103	103
	1392	260	21	22	32	33	100	101
	1393	260	22	23	35	36	104	105
میانگین Average	---	---	22.7	24	33.7	35	101.6	102.7

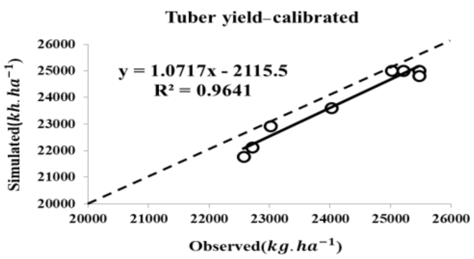
مقادیر میانگین مربعات خطا برای هر دو متغیر در محدوده عالی قرار داشت و از ۷/۴ درصد تجاوز نکرد، بعلاوه شیب خط رگرسیون بین مقادیر دیده‌بانی و شبیه‌سازی شده برای مراحل فنولوژیک و عملکرد با شیب خط ۱:۱ تفاوت معنی‌داری نشان نداد (شکل۲). بر اساس شکل ۲ بیشتر از ۸۷ درصد مراحل فنولوژیک و بالای ۹۰ درصد عملکرد غده سیب‌زمینی، در اطراف خط استاندارد (±SE) مراحل فنولوژیک و عملکرد دیده‌بانی شده قرار دارد. همچنین ضریب تبیین (R^2) نیز همبستگی بالایی (R^2 >0.87) بین مقادیر *دیده‌بانی* شده با مقادیر شبیه سازی شده نشان می‌دهد. مقادیر ME نشان‌دهنده (ME< 12) کارایی بالای مدل می‌باشد. بنابراین، نتایج بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف آماری نشان‌دهنده دقت بالای مدل رشد گیاهی WOFOST در شبیه سازی عملکرد و مراحل فنولوژیک سیب‌زمینی است.

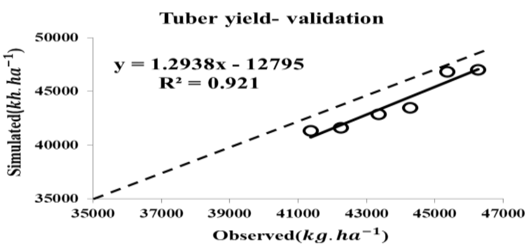
جدول ٤- نتایج کالیبراسیون و تعیین اعتبار مدل برای عملکرد و مراحل فنولوژیک سیب‌زمینی در شرایط پتانسیل

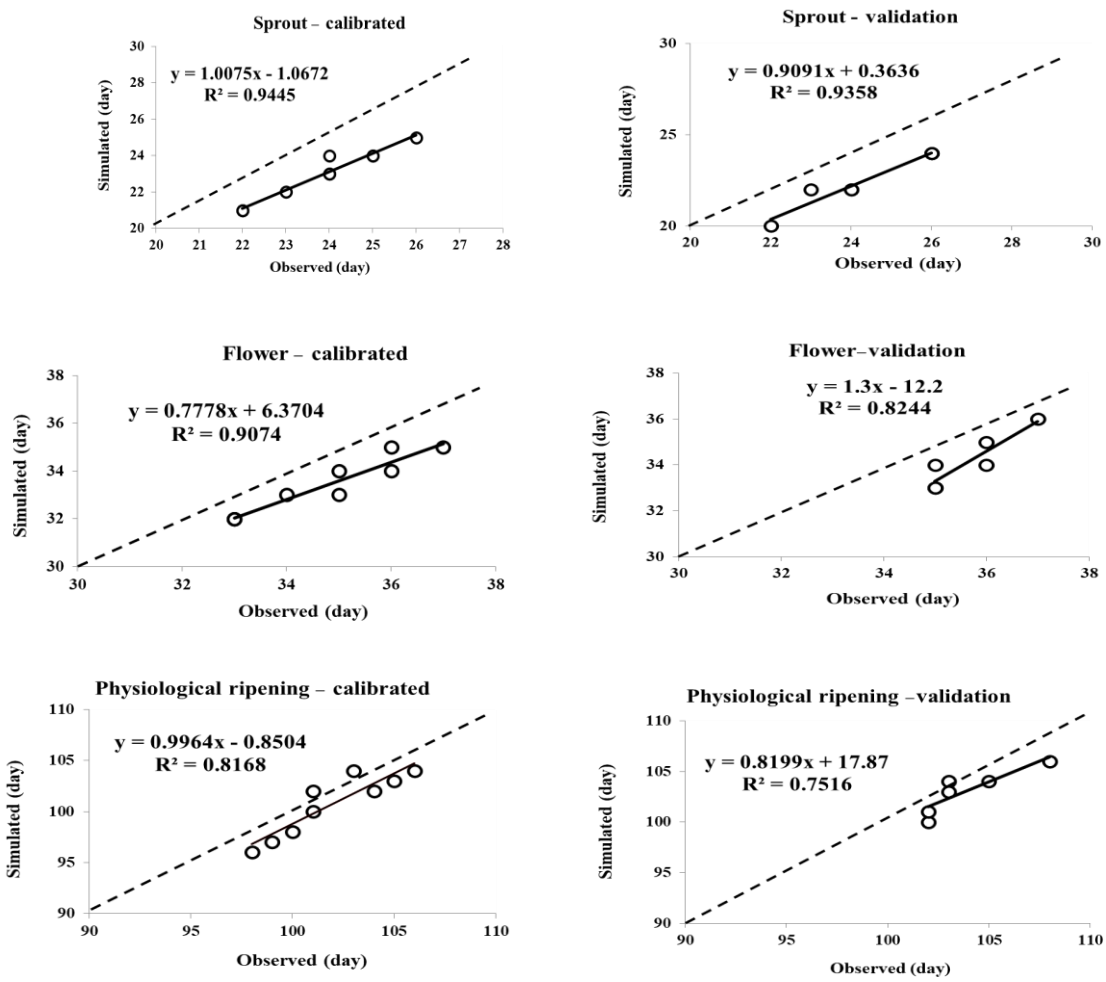
Table 4- Calibration results and model validation for potato yield and phenological stages under potential conditions

	مراحل فنولوژیک و عملکرد Yield and phenological stages	ایستگاه Station	دیده‌بانی Observation	شبیه‌سازی Simulated	RMSE	RMSEn	R^2	ME
کالیبراسیون Calibrated	کاشت-سبز شدن Planting-sprout	جیرفت Jiroft	25	24	1	4	0.93	4
		کهنوج Kahnouj	24	23.5	0.5	2	0.94	2.9
		منوجان Manoujan	23	21.8	0.9	4	1	4.4
	سبز شدن- گلدهی Sprout-flowering	جیرفت Jiroft	35.3	35	1.7	4.9	0.75	5.7
		کهنوج Kahnouj	34.4	33	1.3	4	0.81	5.8
		منوجان Manoujan	32.3	33	0.82	2.5	0.78	3
	سبز شدن- رسیدگی (برداشت) Sprout-physiological (maturity)	جیرفت Jiroft	103.7	100.3	3.6	3.4	0.81	4.8
		کهنوج Kahnouj	101	100	1.7	1.7	0.72	2.5
		منوجان Manoujan	101.3	99.7	1.7	1.7	0.95	1.97
	عملکرد غده Tuber yield	جیرفت Jiroft	44899	44545	567.5	2.5	0.97	1.8
		کهنوج Kahnouj	42765.7	42281	567.5	2.5	0.99	3.5
		منوجان	45232.3	44950.4	390.6	1.6	0.82	2.6

		Manoujan						
تعیین اعتبار validation	کاشت- سبز شدن Planting-sprout	جیرفت Jiroft	24.5	23	1.3	5.2	1	8.2
		کهنوج Kahnouj	24	23	0.82	3.4	1	4.2
		منوجان Manoujan	21.5	21	0.58	2.7	1	4.6
	سبز شدن- گلدهی Sprout-flowering	جیرفت Jiroft	34.5	34.4	0.9	2.6	1	3.5
		کهنوج Kahnouj	34.5	34.3	0.1	0.37	1	0.6
		منوجان Manoujan	34	33.5	1.3	3.8	1	6
	سبز شدن-رسیدگی (برداشت) Sprout-physiological (maturity)	جیرفت Jiroft	105	99.5	4.9	4.7	1	7.6
		کهنوج Kahnouj	102.5	102.3	0.94	0.92	1	1.3
		منوجان Manoujan	104	103.5	0.58	0.55	1	0.96
	عملکرد غده Tuber yield	جیرفت Jiroft	43806.5	42212	3267.5	7.4	1	12
		کهنوج Kahnouj	42716	43180	1764.5	4	1	5.7
		منوجان Manoujan	44563	43996	2685.7	6.7	1	10







شکل ۲- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای عملکرد غده گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی تعیین اعتبار)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

Fig. 2- Comparison of the simulated values with measured values for potato tuber yield (data for 2011, 2012 and 2014 for the calibration stage and data for 2013 and 2015 for the stage Validation), the one-to-one line is also shown in the figure

تولید سناریوهای تغییراقلیم در دوره‌های آتی

عملکـرد مـدل SDSM در ریزمقیـاس‌نمـایی داده‌هـای اقلیمـی بوسیله‌ی شاخص‌های آماری (جـدول ۵) مـورد ارزیـابی قـرار گرفـت. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیـین R^2 در همـه مـوارد از مقـدار قابل توجهی برخوردار است (بالای ۰/۹۹). حداکثر خطـا (ME) بـرای شبیه سازی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش بطور میـانگین بـرای هر سه ایستگاه مورد مطالعه به‌ترتیب ۰/۱۷، ۰/۱۵ و ۱۹/۹ بدست آمد که نشان از خطای بیشتر شبیه سازی بارش نسبت به پارامتر دما مـی باشد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه سـازی بارش نیز نسبت به دیگر پارامترها به‌مراتب بیشتر بوده (۲/۲) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به نتایج جـدول ۵ توانـایی مدل SDSM در شبیه سازی پارامترهای هواشناسی تایید شـده، ولـی با این حال مدل در شبیه سازی بارش دقت کمتری را نشان مـی‌دهـد که با یافته‌هـای جعفرپـور (Jafarpour, 2016)، نظـری و همکـاران (Nazari et al.,2015) و طـایی سـمیرمی و همکـاران (Taie Samiromo et al., 2014) مطابقت دارد. در ادامه نتایج بدست آمده از ارزیابی مدل SDSM در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- کارآیی مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش و میانگین دمای حداقل و دمای حداکثر در دوره دیدبانی با داده‌های NCEP

Table 5- Efficiency of the SDSM model in simulating precipitation and mean minimum and maximum temperature and maximum temperature during the observation period with NCEP data

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria					
		درصد خطا Percentage error	E_{ns}	RMSE	RMSEn (%)	ME	R^2
جیرفت Jroft	دمای حداقل T-min	-0.02	0.99	0.02	0.1	0.21	1
	دمای حداکثر T-max	-0.02	0.99	0.03	0.1	0.24	1
	بارش Precipitation	-4.5	0.99	1.2	0.7	21	0.99
کهنوج Kahnouj	دمای حداقل T-min	-0.03	0.99	0.02	0.1	0.2	1
	دمای حداکثر T-max	0.004	0.99	0.02	0.05	0.1	1
	بارش Precipitation	-1.7	0.99	0.7	0.4	10.8	0.99
منوجان Manoujan	دمای حداقل T-min	-0.04	0.99	0.01	0.07	0.1	1
	دمای حداکثر T-max	-0.04	0.99	0.03	0.1	0.1	1
	بارش Precipitation	-1.8	0.99	1.6	0.8	28	0.99

در جدول ۶ نتایج مربوط به شبیه‌سازی دمای حداقل، حداکثر و بارش در سه دوره آینده تحت سناریوی انتشار RCP4.5, RCP2.6 و RCP8.5 نمایش داده شده است. با توجه به جدول ۶ دمای حداکثر و حداقل شبیه‌سازی شده برای دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۱۱) تحت سناریوهای RCP نسبت به دوره دیدبانی در هر سه سناریو RCP افزایش نشان می‌دهد. بارش نیز در دوره‌های آینده در هر سه سناریوها دچار تغییر شده است و روند روبه کاهش را نشان می‌دهد. میانگین افزایش سالانه دمای حداقل و حداکثر در مناطق مورد مطالعه از ۰/۴ درجه سانتیگراد در سناریوی RCP2.6 تا ۰/۷ درجه سانتیگراد در سناریوی RCP8.5 مشاهده شد. بیشترین افزایش دمای حداکثر و حداقل به‌ترتیب به‌میزان ۱ و ۱/۳ درجه سانتیگراد درایستگاه کهنوج و جیرفت در سناریوی RCP8.5 مشاهده گردیدد. میانگین کاهش بارش به‌میزان ۱/۲ میلیمتر در سناریوی RCP2.6 تا ۱/۷ میلیمتر در سناریوی RCP8.5 نیز مشاهده گردیدد. بیشترین کاهش بارش به مقدار ۳۸ میلیمتر در ایستگاه جیرفت مشاهده شد.

جدول ٦- میزان تغییرات میانگین دمای حداقل و حداکثر و بارش سالانه در ایستگاه‌های منتخب در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۱۰۰-۲۰۷۱ نسبت به دوره دیدبانی تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5

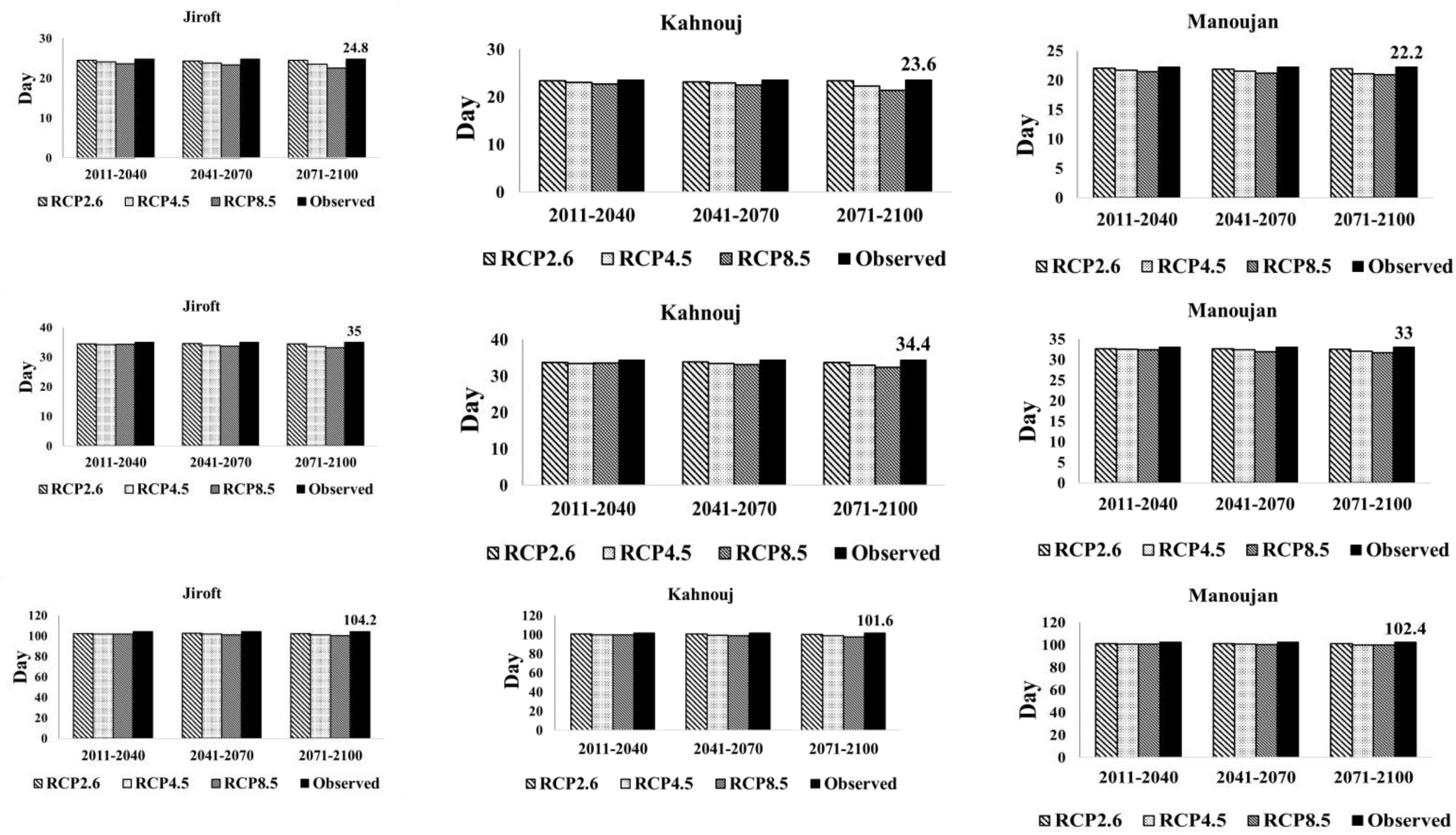
Table 6- Changes in the average minimum and maximum temperatures and annual precipitation at selected stations in the three periods 2040-2011, 2070-2041 and 20100-2071 compared to the observation period under the three emission scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5

ایستگاه Station		دمای حداقل Minimum temperature						دمای حداکثر Minimum temperature						بارش Precipitation					
		جیرفت Jiroft		کهنوج Kahnouj		منوجان Manoujan		جیرفت Jiroft		کهنوج Kahnouj		منوجان Manoujan		جیرفت Jiroft		کهنوج Kahnouj		منوجان Manoujan	
دیدبانی Observed		17		19.7		18.8		32.8		33.7		34.2		175.8		185.9		203.8	
		%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	°C	%	mm	%	mm	%	mm
2011-2040	Rcp2.6	2	0.4	۲	0.4	2	0.4	0.4	0.5	1	0.4	1	0.3	-8	-13	-8	-15	-8	-16
	Rcp4.5	2	0.3	۲	0.4	2	0.5	0.5	0.4	1	0.3	1	0.3	-6	-10	-7	-12	6	-12
	Rcp8.5	2	0.4	2	0.4	2	0.4	0.4	0.5	1	0.4	1	0.3	-8	-14	-7	-14	-9	-18
2041-2070	Rcp2.6	3	0.5	3	0.5	2	0.4	0.4	0.6	1	0.5	1	0.4	-7	-12	-9	-16	-6	-12
	Rcp4.5	4	0.6	3	0.6	3	0.6	0.6	0.7	2	0.6	2	0.5	-11	-19	-12	-22	-6	-12
	Rcp8.5	5	0.8	4	0.9	4	0.7	0.7	1	2	0.8	2	0.7	-18	-31	-13	-24	-5	-10
2071-2100	Rcp2.6	3	0.4	2	0.4	2	0.4	0.4	0.6	1	0.4	1	0.4	-7	-12	-7	-13	-7.5	-15
	Rcp4.5	4	0.7	4	0.8	4	0.8	0.8	1	2	0.7	2	0.6	-14	-25	-14	-27	-3	-6
	Rcp8.5	7	1.2	7	1.3	3	0.5	0.5	1	4	1	۱	0.4	-21	-38	-11	-20	-5	-9

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر طول مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده

تلفیق نتایج حاصل از مدل اقلیمی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6 ,RCP4.5 و RCP8.5 در سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ با مدل شبیه‌ساز رشد و نمو WOFOST نشان داد که طول مراحل مختلف فنولوژیکی، از کاشت تا سبزشدن، سبزشدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی) و عملکرد غده سیب‌زمینی در شرایط پتانسیل در مناطق مورد مطالعه کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل شده با یافته‌های ادواری و همکاران (Advari et al., 2019) و ترکمان (Turkaman, 2016) مطابقت دارد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی در مناطق مورد مطالعه در دوره اقلیمی آینده، طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۳ روز تا ۱/۳ روز کاهش خواهد یافت. در مناطق گرمسیری که دارای زمستان‌های معتدل هستند و کشت پاییزه سیب‌زمینی انجام می‌شود، مرحله‌ی کاشت تا سبز شدن بیشتر از سایر مراحل فنولوژیکی سیب-زمینی، تحت تأثیر اثرات ناشی از گرمایش جهانی خواهد بود. البته تا کنون تأثیر منفی کاهش طول دوره کاشت تا سبزشدن به‌علت گرمایش جهانی بر عملکرد نهایی غده‌های سیب‌زمینی گزارش نشده است (Turkaman, 2016). با این‌وجود افزایش دما، ناشی از تغییراقلیم طول دوره رشد را در مناطق گرمسیری به‌شدت کاهش خواهد داد. بنابراین، موضوع تغییر تاریخ کاشت یکی از آثار گرمایش جهانی و راهکار سازگاری با پدیده گرمایش جهانی می‌باشد (Turkaman, 2016). طول دوره سبزشدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۷ روز تا ۱/۵ روز کاهش خواهد یافت. بطور متوسط میزان کاهش دوره‌ی گلدهی در سناریوی RCP2.6 بین ۰/۵ تا ۰/۸ روز، در سناریوی RCP4.5 در محدوده‌ی ۱ تا ۱/۶ روز و در سناریوی RCP8.5 در محدوده‌ی ۱/۰۵ تا ۱/۷ روز خواهد بود. مرحله‌ی سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها (برداشت) به‌علت طولانی‌تر بودن آن بیشترین کاهش طول دوره در این مرحله اتفاق افتاد. به‌طور متوسط میزان کاهش طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها (برداشت) برای ۳ ایستگاه مورد مطالعه بین ۱/۹ روز در سناریوی RCP2.6 تا ۳/۶ روز در سناریوی RCP8.5 قرار دارد (شکل ۳).



شکل ۳- شبیه‌سازی مدت زمان کاشت تا سبز شدن (بالا)، سبز شذن تا گلدهی (وسط) و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) (پایین) گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Fig. 3- Simulation of planting time to emergence (top), green to flowering (middle) and emergence to physiological maturity (bottom) of potato plant based on CanESM2 model for three climatic periods 2040-2011, 2070-2041 And 2100-2071f under RCP scenarios using the WOFOST model

شبیه‌سازی عملکرد غده سیب‌زمینی

بر اساس گزارشات موجود واکنش عملکرد سیب‌زمینی نسبت به تغییراقلیم بسته به منطقه و سناریوی تغییر اقلیم متفاوت است (Turkaman, 2016). نتایج شبیه‌سازی عملکرد غده سیب‌زمینی نشان‌دهنده‌ی کاهش عملکرد در هر سه ایستگاه مورد مطالعه است (جدول ۷). با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین میزان کاهش عملکرد در دوره سوم (۲۱۰۰-۲۰۷۱) مشاهده شد. درصد کاهش عملکرد غده بطور میانگین بین ۲ تا ۴/۳ درصد در مناطق مورد مطالعه مشاهده شد(جدول ۷).

در ایستگاه جیرفت در سه دوره آتی بطور متوسط، تحت سناریوی RCP2.6، ۱/۵ درصد، سناریوی RCP4.5، ۳/۱ درصد و سناریوی RCP8.5 ۴/۰۵ درصد کاهش عملکرد مشاهده گردید. در ایستگاه کهنوج و منوجان به‌ترتیب در سناریوی RCP2.6، ۱/۶ و ۲/۹ درصد، در سناریوی RCP4.5، ۲/۹ و ۵/۲ درصد و در نهایت، سناریوی RCP8.5، ۴ و ۴،۸ درصد کاهش عملکرد غده مشاهده شد. بنابراین، با توجه به نتایج بدست آمده بیشترین کاهش عملکرد غده سیب‌زمینی در هر سه دوره آینده تحت سناریوهای اقلیمی RCP در ایستگاه منوجان می‌باشد.

جدول ۷- شبیه‌سازی عملکرد غده سیب‌زمینی (کیلوگرم در هکتار) و درصد کاهش عملکرد بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱

Table 7- Simulation of potato tuber yield (kg.ha^{-1}) and yield reduction percentage based on CanESM2 model under RCP scenarios in the studied areas in the periods 2040-2011, 2070-2041 and 2100-2071

ایستگاه Station	دیدبانی Observed		2011-2040			2041-2070			2071-2100		
			RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
جیرفت Jiroft	44353	عملکرد Yield	44010	43914	43707	43370	42767	42345	43637	42262	41605
		درصد Percent	-0.8	-1	-1.5	-2	-3.6	-4.5	-1.6	-5	-6
کهنوج Kahnouj	42741	عملکرد Yield	42289	42091	41761	41878	41661	41323	42013	40790	40060
		درصد Percent	-1	-1.5	-2.3	-2	-2.5	-3	-2	-5	-6.3
منوجان Manoujan	44898	عملکرد Yield	44482	44347	43241	43930	43825	43690	43579	42900	43249
		درصد Percent	-0.9	-1	-1.5	-2	-2.4	-2.7	-3	-4.4	-4

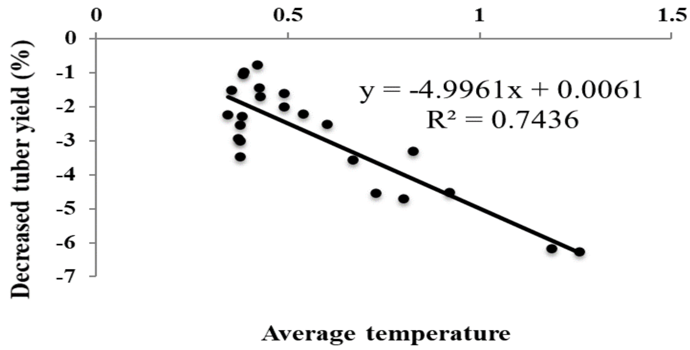
اثرات تغییرات مدت زمان مراحل فنولوژیکی بر عملکرد سیب‌زمینی

به‌منظور ارزیابی روند عملکرد سیب‌زمینی در مناطق مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات ایجاد شده در طول دوره رشد گیاه سیب‌زمینی (کاشت تا سبزشدن، سبزشدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی دمای حداقل و دمای حداکثر با نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده سیب‌زمینی تلفیق گردید. نتایج بیانگر افزایش میانگین دماهای حداقل و حداکثر به‌میزان ۰/۳۷ تا ۰/۹ درجه سانتیگراد طی سه دوره آینده می‌باشد (جدول ۸). طول مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی از سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی (برداشت) به‌موازات افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر کاهش یافته‌اند (جدول ۸). کاهش طول مرحله سبزشدن بین ۰/۲ تا ۱/۹ روز، مرحله گلدهی بین ۰/۵ تا ۱/۷ روز و مرحله سبزشدن تا رسیدگی (برداشت) بین ۱/۴ تا ۳/۵ روز قرار دارد. نتایج جدول ۸ حاکی از آن است که با افزایش میانگین دما، طول مراحل رشد فنولوژیکی گیاه کاهش خواهد یافت و به تبع آن کاهش میزان عملکرد غده سیب‌زمینی را در پی خواهد داشت. همانطور که در جدول ۸ نیز مشاهده می‌شود میزان کاهش عملکرد غده در سناریوی RCP2.6 در دوره اول (۲۰۴۰-۲۰۱۱) از ۶۰۳/۶ کیلو در هکتار به‌مقدار ۲۵۹۲/۳ کیلو در هکتار در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم (۲۱۰۰-۲۰۷۱) رسیده است. بیشترین کاهش در طول مراحل فنولوژیکی مربوط به مرحله سبزشدن تا رسیدگی (برداشت) به میزان ۳/۵ روز است. شکل ۴ نشان می‌دهد که به‌ازای هر یک درجه سانتیگراد افزایش میانگین دما سالانه، عملکرد غده به‌میزان ۴/۹۹ درصد کاهش خواهد یافت.

جدول ۸- مقایسه مدت زمان کاهش مراحل فنولوژیکی (روز) و عملکرد غده سیب‌زمینی (کیلوگرم در هکتار) و افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر (درجه سانتیگراد) بر اساس مدل گردش عمومی CanEMS2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه

Table 8- Comparison of the duration of reduction of phenological stages (days) and potato tuber yield (kg / ha) and increase of Average minimum and maximum temperatures (degrees Celsius) based on the general circulation model anCanEMS2 under RCP scenarios in the study areas

پارامترها Parameter	2011-2040			2041-2070			2071-2100		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Sprout	-0.2	-0.6	-1	-0.4	-0.8	-1.2	-0.3	-1.2	-1.9
Flower	-0.5	-0.7	-0.7	-0.4	-0.9	-1.2	-0.5	-1.3	-1.7
Ripening	-1.4	-1.9	-2	-1.3	-2.1	-2.7	-1.6	-2.7	-3.5
Yield	-603.6	-1138	-921	-746.3	-1712.8	-2479.4	-994	-2077.8	-2592.3
Average temperature	0.37	0.37	0.38	0.45	0.6	0.8	0.4	0.7	0.9



شکل ٤- درصد کاهش عملکرد غده سیب‌زمینی به‌ازای افزایش میانگین دمای سالانه با استفاده از مدل گردش عمومی CanEMS2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه

Fig. 4- Percentage decrease in potato tuber yield for increase in average annual temperature using CanEMS2 general circulation model under RCP scenarios in the studied areas

نتیجه‌گیری

از مصادیق بارز تغییراقلیم افزایش دما و کاهش بارش در اقلیم آینده است. بنابراین، هرگونه تغییر در وضعیت آب و هوای جهان، به طور مستقیم بر تولید محصولات کشاورزی و در نتیجه بر موضوع تامین امنیت غذایی در سطح جهان تاثیرگذار است. در همین راستا در این مطالعه به ارزیابی تاثیرات تغییراقلیم بر عملکرد و طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در سه ایستگاه جیرفت، کهنوج و منوجان، از مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی درکشور محسوب می‌شوند، در آینده پرداخته شد. مناطق نام برده در این مطالعه جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده، از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP4.5, RCP2.6 و RCP8.5، برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۱۱ استفاده گردید. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM2 از نرم‌افزار آماری SDSM و برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی از مدل رشد و نمو WOFOST استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای دما (دمای حداقل و حداکثر)، حاکی از افزایش میانگین دمای حداقل و دمای حداکثر به‌ترتیب از ۰/۳۸ تا ۱ درجه سانتیگراد و ۰/۳۶ تا ۰/۹ درجه سانتیگراد بود. در ایستگاه منوجان در دوره آخر روند افزایش دما از سناریوی RCP4.5 به سناریوی RCP8.5 عکس شده است و میانگین دمای حداقل و حداکثر هر دو در این دوره کاهش می‌یابد و این موضوع می‌تواند نشان از بیابانی شدن هر چه بیشتر اقلیم منطقه در آینده دور باشد. میانگین کاهش بارش در مناطق مورد مطالعه از ۱۱ میلی‌متر تا ۲۲ میلیمتر محاسبه گردید.

نتایج کالیبراسیون و تعیین اعتبار مدل WOFOST حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در مناطق مورد مطالعه بود بطوریکه مقدار RMSEn برای هر دو مورد در مناطق تحت مطالعه زیر ۱۰ درصد بود. طول مراحل فنولوژیکی (کاشت تا سبزشدن، سبزشدن تا گلدهی و سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی(برداشت) در دوره آینده تحت سناریوهای RCP کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب‌زمینی تحت شرایط اقلیم آینده حاکی از کاهش میزان عملکرد در مناطق مورد مطالعه بود. بیشترین کاهش عملکرد در دوره سوم و تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده شد. بطور متوسط در مناطق مورد مطالعه به‌میزان ۱۴۷۳/۹ کیلوگرم در هکتار کاهش عملکرد غده سیب‌زمینی مشاهده گردید. کاهش طول دوره رسیدگی سیب‌زمینی بیشترین سهم را در کاهش عملکرد غده سیب‌زمینی دارد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب‌زمینی نشان می‌دهد که به‌موازات افزایش دما میزان عملکرد غده نیز کاهش می‌یابد و به‌ازای هر یک درجه سانتیگراد افزایش میانگین دمای سالانه، عملکرد غده به‌میزان ۴/۹۹ درصد کاهش خواهد یافت.

References

1- Advari, Z., Tadayon, M. R., & Arani Baghbani, A. (2019). Effect of Climate Change on potato Production and assessment adaptation strategies in Fereydounshahr. *Journal of Plant Process and Function*, 8,151-169. (In Persian with English Summary) http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1398.8.29.18.0

2- Bani Hashemi, S.(2012). Assessment of climate change and related damages in the country. *Quarterly Journal of Forests, Rangelands and Watershed Management Organization* 94 and 93, 13-5. (In Persian with English Summary)

3- Bayatani, F. (2019). Study of the effects of climate change on yield and water requirement of potato plant in Iran. PhD Dissertation, Faculty of Literature, *Hakim Sabzevari University of Sabzevar*, Iran. (In Persian with English Summary)

4- Darzi Naftchali, A., & Karandish, F.(2016). Rice cultivation management in Mazandaran Province under climate change . *Journal of Water Research in Agriculture*, 30, 33-346. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/jwra.2016.107154

5- Delghandi, M., Massah Bovani, A. R., Ajorlou, M. J., Broomandnasab, S., & Andarzian, B. (2014). Risk assessment of climate change impacts on production and phenology of wheat (case study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Irrigation Management*, 4, 161-175. (In Persian with English Summary) https://doi.org/10.22059/jwim.2014.53032

6- Esmaili, R., Ataie, H., & Falah Ghalhary, G. (2011). Evaluation of the effects of climate change on the possibility of developing two nucleated species of almond and apricot (Case study: Khorasan Razavi). *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 21, 162-145. (In Persian with English Summary)

7- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *An FAO Perspective*. http://www.fao.org.

8- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *Plant Production and Protection Paper* 17. FAO, Rome.

9- Fischer, G.F.N., Tubiello, H., Velthuizen, V., & Wiberg, D.A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements. *Technological Forecasting & Social Change*, 74, 1083-1107. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.021

10- Gouache, C.H., Bris, X., Bogard, L.M., Deudon, O., Pagé, C.H., & Philippe, P.H. (2012). Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *European Journal of Agronomy*, 39, 62-70. https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.009

11- Jafarpour, S., h. (2016). Investigating the effects of climate change on water demand and yield of major crops in Ardabil plain. Master Thesis, Faculty of Agriculture and Natural Resources, *Mohaghegh Ardabili University of Ardabil*, Iran. (In Persian with English Summary)

12- Khajehpour, M. R. (2008). Principles and foundations of agriculture. *Isfahan University Jihad Publications, Isfahan.*

13- Nazari, S. h., Taheriun, M., & Ahmadi, A. (2015). Investigation of the effects of climate change on temperature and precipitation in the catchment area of Mahabad Dam (using CanESM2 model), the second national conference on architecture. *New Urban Development, National Center of Iranian Architects*, Urmia, 5 October 2015. (In Persian with English Summary) https://civilica.com/doc/418378.

14- Supit, I., Hooyer, A.A., & Van Diepen, C. A. (1994). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and algorithms. *EUR publication* 15956, Agricultural series, Luxembourg.

15- Taei Semiromi, S., Moradi, H. R., & Khodagholi, M. (2014). Simulation and prediction some of climate variable by using multi line SDSM and Global Circulation Models (Case study: Bar Watershed Nayshabour). *Human and Environment Quarter*ly, 28, 15-1. (In Persian with English Summary)

16- Taei Semiromi, J., Ghanbari, A., Amiri, I., Ghaffari, A. A., Siahsar, B., & Ayobi, Sh. (2012). Agroecological Zoning of Wheat in the Borujen Watershed: Rianfed and Irrigated Wheat Cropping System Evaluation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 22(4), 12-1. (In Persian with English Summary)

17- Turkman, M. (2016). Investigating the effect of future warming and climate change on agricultural characteristics and potato production in Iran. PhD Dissertation, Faculty of Agriculture, *Ferdowsi University of Mashhad*, Iran.

18- Willby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E. M. (2002). SDSM a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Soft*ware, 17, 145-157. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3